

УДК 621.039.54:666.794:536.421.5

EDN SMZHSN

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА СПЕКАНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В.В. Гузеев, А.Н. Жиганов, Т.И. Гузеева

*Национальный исследовательский ядерный университет. МИФИ. Северский
технологический институт, СТИ НИЯУ МИФИ, г. Северск
uranilf@yandex.ru*

Приведены результаты анализа механизма и последовательности процессов спекания и теоретических моделей спекания керамических материалов. Приведены расчеты градиента температуры при спекании таблетки на основе диоксида и нитрида урана. Рассмотрены представления о структуре и энергетике атомов и молекул в керамических соединениях урана. Работа выполнена для формирования более полного представления о спекании материалов и регулировании процесса спекания.

Ключевые слова: спекание, диоксиды урана, плутония, нитриды урана, плутония, градиент температуры, кристаллические структуры

ANALYSIS OF THE SINTERING MECHANISM OF CERAMIC NUCLEAR FUEL

V.V. Guzeev, A.N. Zhiganov, T.I. Guzeeva

*National Research Nuclear University. MEPHI. Seversky Technological Institute,
STI NRU MEPHI, Seversk
uranilf@yandex.ru*

The results of the analysis of the mechanism and sequence of sintering processes and theoretical models of ceramic materials sintering are presented. Calculations of the temperature gradient during sintering of a tablet based on uranium dioxide and nitride are given. The concepts of the structure and energy of atoms and molecules in ceramic compounds of uranium are considered. The work was carried out to form a more complete understanding of the materials sintering and to regulate the sintering process.

Key words: sintering, uranium dioxides, plutonium, uranium nitrides, plutonium temperature gradient, crystal structures

Введение

Основным веществом керамического ядерного топлива в настоящее время является диоксид урана. Диоксид урана - это тугоплавкое соединение с температурой плавления 2880 °С; спрессованный порошок спекают при температуре выше 1700 °С. [1] Нитриды урана и плутония - материалы для перспективного ядерного топлива, - также являются тугоплавкими соединениями, и их порошки спекают также при высокой температуре. После спекания порошка получается поликристаллический компактный керамический материал с плотностью, близкой

к теоретической [2]. Основой теоретических представлений о спекании порошков являются диффузионные модели, в которых предполагают стационарную и нестационарную диффузию согласно 1 и 2 закона Фика [3]. Теория предполагает, что вещество может содержать жидкую или газообразную фазы. Согласно диаграммам U-O, Pu-O, U-N, при температуре спекания оксидов и нитридов жидкая и газовая фазы отсутствуют [1, 2]. Поэтому потребовалось пересмотреть теоретические представления о спекании тугоплавких соединений. Впоследствии предполагается получать различные композиции для спекания ядерного топлива.

В процессе рефабрикации ядерного топлива необходимо будет перерабатывать и спекать композиции различного химического изотопного состава, не известные ранее.

Основные параметры спекания - температура спекания, время спекания, количество энергии, затраченное на спекание, плотность спеченного материала - всегда требуют оптимизации. Для оптимизации требуется знать механизм спекания, который является наиболее близким для описания спекания тугоплавкого соединения.

Постановка задачи

I. Материалом для спекания в основе являются порошки диоксидов урана и плутония и нитридов урана и плутония. Принципиальным отличием оксидов и нитридов является их кристаллическая структура и теплопроводность. Диоксиды урана и плутония кристаллизуются в кубической решетке типа флюорит CaF_2 . Мононитриды урана и плутония кристаллизуются в кубической решетке типа галенит NaCl . Теплопроводность нитридов выше теплопроводности оксидов в широком интервале температур.

II. Плотность спрессованного порошка составляет примерно 0,6 от теоретической плотности. В процессе спекания происходит полное объединение порошка и превращение в компактную поликристаллическую структуру материала. Происходит перенос вещества с исчезновением пор в спрессованном материале. В нитридах и оксидах при температуре спекания отсутствуют подвижные жидкая и газообразная фазы [1, 2]. Перенос вещества может происходить без образования фаз, а только за счет движения атомов, составляющих соединение.

III. В кристаллической решетке за счет теплового движения образуются дефекты. Амплитуда колебания атомов в кристаллической решетке и их кинетическая энергия подчиняются закону распределения по энергии Максвелла. Если их кинетическая колебательная энергия превысит энергию связи атома в кристаллической решетке, атомы получают возможность свободно передвигаться. Следует отметить, что для образования свободного атома необходимо затратить энергию (в данном случае повысить температуру). В процессе движения свободного атома после соударений и излучения атом теряет кинетическую энергию, вновь образует связь с кристаллической решеткой. При обратном процессе соединения атома с

кристаллической решеткой энергия выделяется. Общий энергетический баланс атома: при отрыве энергия затрачивается, а при присоединении примерно столько ее и выделяется. Тогда энергия нагревателя затрачивается на перенос атома из начального до конечного и на тепловые потери. Процесс спекания закончится при заполнении всех пустот и образовании поликристаллической структуры.

IV. Происходящий перенос направлен от нагреваемой поверхности вглубь спрессованного порошка, в сторону уменьшения температуры. Создаваемый в процессе спекания градиент температуры является движущим процессом переноса вещества. Поскольку в межпоровом пространстве происходит свободное движение атомов, то атом затормозится, потеряет энергию только при соударении с менее нагретым веществом части порошка.

V. Необходим расчет, в течение какого времени в постоянно нагреваемой, спекаемой таблетке температура на поверхности сравняется с температурой внутри. При постоянном нагревании без охлаждения через какое - то время градиент температуры исчезнет и перенос прекратится. Спекание происходит в течение определенного времени при максимальной температуре. Возможны два варианта самопроизвольного охлаждения: конвективный унос тепла газовой атмосферой; излучение нагретого тела. При этом общий тепловой баланс процесса спекания будет состоять из количества подводимого тепла извне, и оно равно: 1 - энергии, затраченной на перенос вещества; 2 - конвективный унос тепла, 3 - излучение нагретого тела.

VI. Кристаллическая структура влияет на спекание материала. Диоксиды урана и плутония кристаллизуются в кубической решетке типа флюорит CaF_2 . Мононитриды урана и плутония кристаллизуются в кубической решетке типа галенит NaCl . В кристалле диоксида урана для ионов урана координационное число равно 8, а для ионов кислорода - 4. Так, в UN , PuN со структурой галита (NaCl) координационное число атомов U , Pu равно 6 (вокруг него расположено по шесть атомов азота) N , координационное число азота также равно 6 (каждый атом азота соседствует с шестью атомами U , Pu). Следует учитывать, что соединения имеют нарушения в кристаллической решетке в виде дефектов, т.е. количество связей будет отличаться от идеальной кристаллической решетки. Атомы на поверхности порошка

по количеству связей между собой также отличаются от идеальной кристаллической структуры соединения.

В предыдущей статье [4] была предложена гипотеза относительно того, что атомы в кристаллической структуре становятся подвижными при условии, когда кинетическая энергия атома становится больше энергии связи. Величину кинетической энергии атомов и среднюю скорость движения свободного атома можно оценить по известной формуле: $E=3/2kT=mV^2/2$. Температура, при которой атом может свободно перемещаться внутри кристаллической структуры, обозначена как температура отрыва $T_{отр}$.

В данной статье для оценки соотношения кинетической энергии и энергии связи в кристаллической структуре можно взять справочную величину для аналогичных соединений, а впоследствии в отдельном исследовании энергия связи может быть определена расчетным путем [5]. При движении атом сталкивается с другими, гасит свою энергию, и связывается с кристаллом. Таким образом, происходит перенос атомов, происходит заполнение пустот и образуется новая кристаллическая структура. Происходит спекание порошка с образованием сплошного керамического материала. С точки зрения термодинамики процесс спекания является неравновесным. Но для определения движущего потенциала спекания все равно требуется термодинамический подход.

Движущей силой при спекании является температура, причем градиент высокой температуры направлен от поверхности вглубь спрессованного спекаемого материала, где температура меньше.

Основная часть

Перенос происходит от высокой температуры к низкой. При равенстве температур на поверхности и внутри таблетки перенос атомов станет ненаправленным, хаотичным. В этом случае перенос не прекращается, а закончится, когда сумма кинетической энергии атомов «таблетки» станет равна сумме энергии связи атомов, - наступает псевдо равновесие. Дальнейшее нагревание теряет смысл, и требуется

определить время и затраченное тепло на спекание.

$$\sum_{кин} E = \sum_{св} E \quad (1)$$

Требуется установить, когда и при каких условиях произойдет выравнивание температуры, поверхности и внутреннего объема таблетки. Это зависит от теплопроводности материала.

Теплопроводность моонитрида урана возрастает с увеличением температуры и в диапазоне 50–1770 К составляет 7–30 Вт/(м·К). При этом разброс коэффициента теплопроводности при фиксированной температуре может достигать 50%, например, при 1200 К он равен 18,9–27,3 Вт/(м·К) [6,7]. Теплопроводность существенно зависит от пористости, особенно при температуре выше 600 К. Так, с увеличением пористости до 20% коэффициент теплопроводности уменьшается, например: с 22 для плотности 100% теоретической до 13,2 Вт/(м·К) для плотности 83% теоретической при 700 К и с 29 для плотности 100% теоретической до 15 Вт/(м·К) для плотности 83% теоретической при 1770 К. [7] Теплопроводность нитрида урана в 4–8 раз выше, чем у диоксида урана, при типичных рабочих температурах. [7,8].

Теплопроводность диоксида урана составляет 4,5 Вт/(м·К) при температуре 800 °С. С повышением температуры до 1000–1500 °С теплопроводность диоксида урана значительно уменьшается. При высоких температурах (выше 2000 °С) наблюдается некоторое увеличение теплопроводности, связанное с ростом вклада радиационного переноса тепла [9,10]. Результаты зависимости коэффициента теплопроводности UO_2 от температуры имеют значительный разброс, составляющий от ± 20 до 30% средних значений. Это объясняется влиянием пористости, структуры и нестехиометрии образцов, а также разницей в методиках исследований. [9,10]

Чем выше теплопроводность, тем меньше будет разность температуры между поверхностью и внутренним объемом, согласно уравнению теплопроводности. Схема таблетки в разрезе представлена на рис. 1.

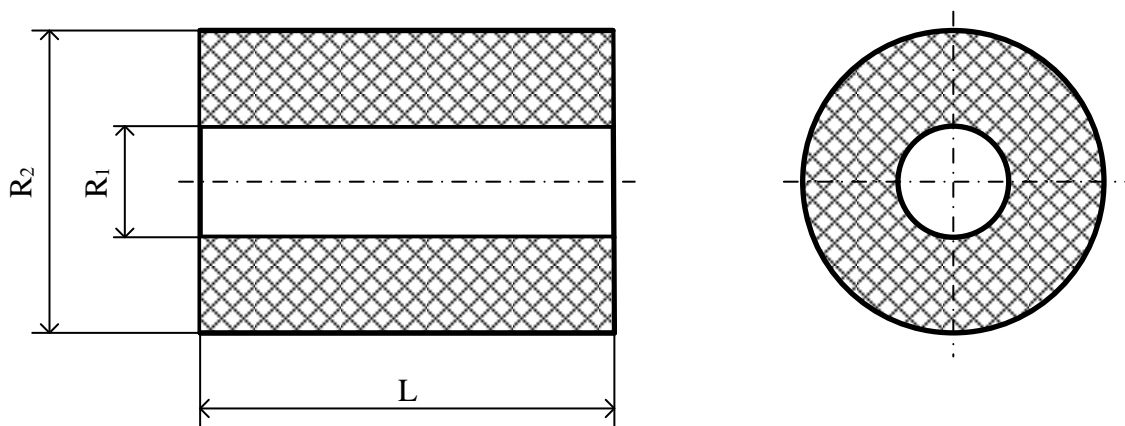


Рис. 1. «Таблетка» в разрезе.

Общее уравнение теплопроводности

$$Q = \frac{\gamma}{\Delta} (T_{ст1} - T_{ст2}) S \tau \quad (2)$$

Где, $T_{ст1}, T_{ст2}$ - температура стенки «таблетки»:

$S = 2\pi R L$ площадь внешней поверхности;

γ - теплопроводность;

τ - время

L - длина «таблетки»;

$\Delta = R_2 - R_1$

Уравнение теплопроводности для цилиндрической однослойной стенки получается интегрированием исходного уравнения:

$$Q = -\gamma \frac{dT}{dR} 2\pi R L \tau \quad (3)$$

$$Q = \frac{2\pi L \tau (T_{ст1} - T_{ст2})}{\frac{1}{\gamma} 2.3 \lg \frac{R_2}{R_1}} \quad (4)$$

По уравнению (4) рассчитывается время нагревания «таблетки» оксида и нитрида урана до температуры спекания.

Тепло на нагревание рассчитывается по формуле:

$$Q = c m (T_{ст1} - T_{ст2}) \quad (5)$$

Где, C - теплоемкость оксида или нитрида урана:

m - масса таблетки.

$m = S L \rho$

ρ - плотность материала кг/м³

После подстановки и преобразования получается

Время

$$\tau = \frac{2.3 (R_2^2 - R_1^2) \rho c \lg \frac{R_2}{R_1}}{2\gamma} = \frac{2.3 (R_2^2 - R_1^2) \lg \frac{R_2}{R_1}}{2\alpha} \quad (6)$$

$\alpha = \frac{\gamma}{\rho c}$ - коэффициент температуропроводности, м²/с. (7)

Численное значение:

$$\alpha_{UN} = \frac{\gamma}{\rho c} = \frac{17,0}{47,70 \times 14,32 \times 10^3} = 2,489 \times 10^{-5} \quad (8)$$

$$\alpha_{UO_2} = \frac{\gamma}{\rho c} = \frac{8,5}{58,31 \times 10,97 \times 10^3} = 1,33 \times 10^{-5} \quad (9)$$

Подставляя примерные значения геометрических размеров «таблетки», можно определить время прогрева на всю глубину стенки.

$$\tau = \frac{7,02147 \times 10^{-5}}{\alpha} \quad (10)$$

Для таблетки UO₂ время прогрева на всю глубину

$$\tau_{UO_2} = 5,28 \text{ секунд}$$

Для таблетки UN время прогрева на всю глубину

$$\tau_{UN} = 2,82 \text{ секунд}$$

Если рассчитать скорость движения активного атома урана или кислорода, то время их движения составит доли секунды. Но, если поддерживать высокую температуру, атом не закрепится в кристаллической структуре и будет хаотично перемещаться. Без отвода энергии перенос происходит, а вот закрепление в кристаллической решетке нет. Если отсутствует градиент температур, движущая сила исчезает. Необходимы стоки энергии. Такими каналами являются излучение и унос тепла газовой средой [11]. R - количество энергии, переносимое в единицу времени через выделенную площадь.

$$R = \sigma T^4 \quad (11)$$

Где, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ - постоянная Стефана-Больцмана.

$$R = Q / S \tau,$$

$Q = R S \tau$ - количество энергии излучаемой при температуре спекания

$$Q = cm(T_1 - T_2) = RS\tau$$

$$(T_1 - T_2)_{UN} = \frac{\sigma T^4 \tau}{\rho CL} \quad (12)$$

Подставляя численные значения, можно получить значение уменьшения температуры за счет излучения

$$(T_1 - T_2)_{UN} = \frac{\sigma T^4 \tau}{\rho CL} = \frac{5.67 \cdot 10^{-8} (1770)^4 \cdot x1}{14.32 \cdot 10^3 \cdot x47.70 \cdot x15 \cdot x10^{-3}} = 54 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13)$$

Уменьшение температуры за счет уноса тепла газовой атмосферы зависит от конкретных параметров спекания таблеток, которые можно будет рассчитать впоследствии. В целом, приведенные расчеты являются только показательными. Реальные расчеты, вероятно, можно провести на компьютере, составив полный алгоритм спекания таблеток.

Температуру спекания и количество перенесенного материала можно определить исходя из структуры и энергии кристаллической решетки спекаемых соединений. [12]. Мононитриды урана и плутония кристаллизуются в кубической решетке типа галенит NaCl. Так, в галите (NaCl) координационное число натрия – 6 (вокруг него расположено по шесть атомов хлора), координационное число хлора также – 6 (каждый атом хлора соседствует с шестью атомами натрия). Координационное число в кристалле — это число ближайших к данному атому или иону соседних атомов или ионов в структуре кристалла. При этом не важно, являются они атомами того же сорта, что и центральные, или иного.

Диоксиды урана и плутония кристаллизуются в кубической решетке типа флюорит CaF₂. В кристалле флюорита для ионов кальция координационное число равно 8, а для ионов фтора — 4. Структура флюорита относится к общему мотиву для соединений с формулой MX₂. Ионы X занимают восемь тетраэдрических междоузлий, а ионы M занимают обычные места в структуре гранецентрированного куба (ГЦК).

Энергия кристаллической решетки определяется количеством связей (потенциальной энергией) между атомами, т.е. координационным числом. Потенциальную энергию можно представить как произведение координационного числа кристаллической решетки нитрида урана и энергии связи между атомами [4].

Табличных данных по энергии связи атомов в кристаллические решетки нитридов и оксидов

нет. Энергия кристаллической решетки рассчитывается несколькими методами, но это отдельная задача [5]. Эти процессы требуют компьютерного расчета и моделирования.

В монографии представлен обзор о диссоциации нитридов урана и плутония при температуре спекания и выше [13]. Диссоциация - это процесс атомизации нитридов, который предполагает, что при направленном градиенте температур будет происходить направленное движение атомов в сторону уменьшения температуры по порам спекаемого порошка. Процесс спекания на примере нитрида урана представляется следующим образом. Вероятность образования и последующего движения свободных атомов урана и азота определяется отношением их кинетической энергии к потенциальной (энергии связи).

При нагревании система выходит из равновесного состояния, но термодинамика позволяет оценить энергетический потенциал. В классической термодинамике рассматривается только рабочее тело, совершающее работу при переходе из одного состояния системы в другое. При этом не рассматривается структура рабочего тела, а только его параметры: температура, объем и давление. Фактор времени не принимается. Закон сохранения энергии для системы можно записать как сумму энергии связи атомов (потенциальной) и кинетической энергии:

$$H = Z + K \quad (14).$$

Где, *H* - общее теплосодержание системы;
Z - энергия связи атомов системы (потенциальная энергия);
K - кинетическая энергия атомов системы.

В состоянии равновесия теплосодержание системы будет равно сумме кинетической и энергии связи (потенциальной энергии). Нагревание приводит к изменению кинетической энергии атома за счет увеличения амплитуды колебания. При изменении расстояния между атомами также изменяется энергия связи.

При отношении ($K \geq Z$), когда кинетическая энергия станет больше первоначально определенной энергии связи, атом становится не связанным с исходной структурой, и появляется вероятность его свободного движения. В процессе движения будет происходить уменьшение кинетической энергии; вероятно, произойдет соединение с кристаллической решеткой в

другом месте, где энергия связи превысит кинетическую энергию атома. Количество активных частиц в системе, появившихся в результате нагревания, будет равно количеству переносимого вещества под действием температурного градиента.

Если принять, что отношение K/Z есть вероятность появления активной частицы, способной двигаться в системе:

$$\frac{N_0 K}{Z} = N_i \quad (15).$$

Где, N_0 -общее количество атомов в рассматриваемой системе (например в спекаемой таблетке).

Выражение (15) может определить количество всех возможно активных атомов при спекании. Но все атомы не могут перейти в активное состояние - это будет соответствовать плавлению или испарению вещества, - что при спекании не достигается. Кинетическая энергия имеет распределение согласно уравнению Максвелла-Больцмана. В теории по молекулярной физике дается понятие о распределении по скоростям и кинетической энергии для газов; в твердом теле с изменением кинетической энергии будет изменяться и величина потенциальной (энергия связи), поэтому для твердого тела требуется компьютерное моделирование функций распределения по энергиям связи и кинетической [14]. По функции распределения Максвелла определяется количество атомов с энергией выше энергии связи. Произведение функции распределения на вероятность образования активных атомов, поделенное на объем, равно их концентрации.

Выражение $K \geq Z$ определяет вероятность появления активных молекул. Умноженная на общее число молекул в системе и поделенная на объем, она равна вероятности появления активных частиц, т.е. их концентрации:

$$\frac{K_i}{Z_i} \cdot \frac{N_i}{V_i} f(U, N) = C_i \quad (16)$$

При таком определении активной частицы скорость изменения ее концентрации, т.е. движения при спекании, можно записать:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{dK}{d\tau} \frac{N_i}{VZ} \quad (17)$$

Так как образование и движения активных атомов урана и азота будут происходить одновременно, необходимо считать этот процесс

как сумму событий. По теории вероятности сумма событий выражается произведением их вероятностей и равна единице [15].

Вероятность образования активных атомов азота и урана представлена формулами (18, 19)

$$W_N = \left(\frac{M_N v^2}{2Z_N} \right) \quad (18)$$

$$W_U = \left(\frac{M_U v^2}{2Z_U} \right) \quad (19)$$

Уравнение (18) и (19) есть отношение кинетической энергии атомов урана и азота к их потенциальной энергии. Это отношение выражает вероятность существования этих частиц в свободном, не связанном виде [4]. Когда события происходят одновременно, т. е. сумма событий численно равна произведению вероятностей. Произведение вероятностей равно единице, так как без образования активных атомов не происходило бы движения атомов, заполнения пустот и спекания порошка, что подтверждается экспериментально.

$$W_N W_U = \left(\frac{M_U v^2}{2Z_U} \right) \left(\frac{M_N v^2}{2Z_N} \right) \quad (20)$$

Используя выражение (16) и подставляя в левую и правую часть уравнения (20), получаем

$$\left(\frac{M_U v^2}{2Z_U} \right) f(U) \left(\frac{M_N v^2}{2Z_N} \right) f(N) = C_U C_N \quad (21)$$

Где $f(U), f(N)$ – функции распределения Максвелла атомов урана и азота по кинетической энергии, т.е. количество активных атомов.

Изменение концентрации атомов во времени зависит от температуры, т.е. кинетической энергии, которая стоит в числителе уравнения (21). Так как спекание происходит при нагревании до определенной температуры, атомы урана и азота в нитриде урана заполняют пустоты, и можно утверждать, что вероятность этого события близка к единице. Внешний источник увеличивает кинетическую энергию и подвижность атомов урана и азота. В знаменателе выражения находится значение энергии связи атомов азота и урана.

Количественную оценку концентрации свободных атомов азота и урана можно провести, но вместе с образованием происходит поглощение этих атомов присоединением их к кристаллической решетке. Происходит обратный

процесс - это и является основой завершающей фазы процесса спекания. Вероятность обратного процесса будет выражаться формулами.

$$W_N^{\#} = \left(\frac{2Z_N}{M_N v^2}\right) \quad (22)$$

$$W_U^{\#} = \left(\frac{2Z_U}{M_U v^2}\right) \quad (23)$$

$$W_N^{\#} W_U^{\#} = \left(\frac{2Z_N}{M_N v^2}\right) \left(\frac{2Z_U}{M_U v^2}\right) \quad (24)$$

Формула (24) показывает, что процесс соединения атомов с кристаллической решеткой происходит как обратный процесс атомизации и завершающий процесс спекания.

Вероятность движения свободного атома до образования связи с кристаллической решеткой как отношение:

$$W_l = \frac{v\tau}{l}, \quad (25)$$

где v - скорость движения атома; τ - время; l - длина пробега атома до образования связи.

В целом, весь процесс можно разложить на этапы: 1- вначале происходит атомизация спекаемых веществ; 2 - затем происходит перемещение атомов по пустотам; 3 - окончательный процесс состоит в присоединении атомов на свободном месте. Процесс спекания - это сумма последовательных событий, которые происходят не одновременно и, возможно, периодически.

Формула для расчёта вероятности последовательных событий основана на обобщённой теореме умножения вероятностей. Согласно ей, вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятности одного из них на условные вероятности других. При этом условная вероятность каждого последующего события вычисляется в предположении, что все предыдущие события произошли.

Для расчета принимается формула о сложении вероятностей. Вероятность появления одного из двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий: $P(A+B) = P(A) + P(B)$. [15]

$$W_{\text{спек.}} = W_N W_U + W_N^{\#} W_U^{\#} + W_l \quad (26)$$

$$W_{\text{спек.}} = \left(\frac{M_U v^2}{2Z_U}\right) \left(\frac{M_N v^2}{2Z_N}\right) + \left(\frac{2Z_N}{M_N v^2}\right) \left(\frac{2Z_U}{M_U v^2}\right) + \frac{v\tau}{l} = 1 \quad (27)$$

Первый член уравнения (27) показывает, что вероятность образования активных свободных

частиц зависит как от соотношения кинетической энергии, так и энергии связи атомов ($K \geq Z$). Количество свободных атомов определяется функцией распределения $f(U, N)$ по энергии. Так как эта функция определена в самом общем виде, то конкретные её параметры необходимо определяют в процессе компьютерного моделирования.

Второй член этого уравнения показывает вероятность «остывания» и возвращения атомов в кристаллическую решетку на новом месте при окончании спекания.

Третий член уравнения показывает вероятность перемещения свободного атома со скоростью v за время τ в свободном пространстве поры на расстояние l . Сумма этих вероятностей равна единице, как факт произошедшего спекания порошка в таблетке.

Общая формула спекания показывает, что процесс многофакторный и многостадийный, и поэтому, кроме качественных оценок, требует компьютерного моделирования и сравнения с практическими реальными данными. Это позволит оптимизировать процесс спекания без проведения дорогостоящих экспериментов.

В монографии [13] показано, что нитрид плутония при определенной температуре испаряется в виде фазы моонитрида и при этом не изменяется его химический состав независимо от температуры. Это необходимо учитывать при спекании уран-плутониевого нитридного топлива. В этом случае потребуется применить другую модель. Процесс переноса отдельной фазы исследован в виде химических газотранспортных реакций [16,17]. Расчеты в этом случае выполняются по другим моделям и формулам. Основой этих представлений является обязательное присутствие малых концентраций газа носителя.

Заключение

1. Спекание оксидов и нитридов урана и плутония осуществляют под действием градиента температуры.

2. Рассчитано, что градиент температуры без стока тепла существует несколько секунд, после чего спекание прекращается, поэтому кроме естественного излучения требуется создавать каналы стока энергии.

3. Показано на основании литературных источников и теоретических расчетов, что при нагревании происходит атомизации оксидов, нитридов урана и плутония, что является главным процессом переноса вещества и спекания порошка.

4. Теоретически определена концентрация активных атомов спекаемого соединения.

5. Процесс спекания керамического ядерного топлива - многофакторный многостадийный процесс.

Список литературы

1. Жиганов А.Н., Гузеев В.В., Андреев Г.Г. *Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива: Учеб. Пособие. По специальности «Химическая технология материалов современной энергетики»* Томск: STT, 2002.-328 с.:ISBN 5-93629-127-8.
2. Алексеев С.В., Зайцев В.А. *Нитридное топливо для ядерной энергетики. Техносфера М.: 2013.- 240 с. ISBN 978-5-94836-374-5.*
3. Гегузин Я. Е. *Физика спекания.*-2 изд.-М.: Наука, 1984.-312 с.
4. Гузеев В. В. *Оптимизация спекания керамики на примере соединений урана. ВАНТ №4(125), 2024, с.64-73*
5. Леменовский Д.А. *Теоретическая неорганическая химия. Конспект лекций. (часть 1) Химфак МГУ, 2024.(электронная версия)*
6. Holleman, Arnold Frederik; Wiberg, Egon (2001), Wiberg, Nils (ed.), *Inorganic Chemistry*, translated by Eagleson, Mary; Brewer, William, San Diego/Berlin: Academic Press/De Gruyter, ISBN 0-12-352651-5
7. Р. Б. Мэтьюз; К. М. Чидестер; К. В. Хом; Р. Э. Мейсон; Р. Л. Петти (1988). "Изготовление и испытание топлива из нитрида урана для космических энергетических реакторов". *Журнал ядерных материалов*. 151 (3): 345. Bibcode:1988JNuM..151..345M. doi:10.1016/0022-3115(88)90029-3.
8. Громов Б. В. *Введение в химическую технологию урана.* — М.: Атомиздат, 1978.
9. Кац Дж., Рабинович Е. *Химия урана: уран как элемент, его бинарные соединения, гидраты окислов и оксигалогениды.* — М.: Иностранная литература, 1954.
10. Шевченко В. Б., Судариков Б. Н. *Технология урана.* — М., 1961.
11. Ельяшевич М. А. *Абсолютно чёрное тело // Физическая энциклопедия. В 5 томах / Главный редактор А. М. Прохоров.* — М.: Советская энциклопедия, 1988
12. Сергеева, В. В. *Кристаллография и минералогия: учеб.-метод. пособие / В. В. Сергеева.* — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017 — 152 с.
13. Казенас Е.К., Цветков Ю.В. *Термодинамика испарения нитридов / Е.К. Казенас, Ю.В. Цветков.* — М.: РАН, 2021. — 448 с.
14. Зубарев Д. Н., Морозов В. Г., Рёпке Г. «Статистическая механика неравновесных процессов». Том 1. — М.: Физматлит, 2002. ISBN 5-9221-0211-7.
15. Вейтцель Е.С. *В 29 Теория вероятностей: Учеб. для вузов.* — 10-е изд. стер. — М.: Высш. шк., 2006. — 575 с.: ил. ISBN 5-06-005688-0
16. Шефер Р. *Химический транспорт как препаративный метод. В кн. Препаративные методы в химии твердого тела. М.: Мир, -1978-с 277-303.*
17. Геваргизов Е.И. *Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука, -1977-303 с.*

Поступила в редакцию / Received 20.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 26.03.2025

Принята к публикации / Accepted 28.08.2025